

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-277868

(43)Date of publication of application : 06.10.2000

(51)Int.Cl.

H01S 5/343

H01L 33/00

H01S 5/22

H01S 5/347

(21)Application number : 11-082510

(71)Applicant : SANYO ELECTRIC CO LTD

(22)Date of filing : 25.03.1999

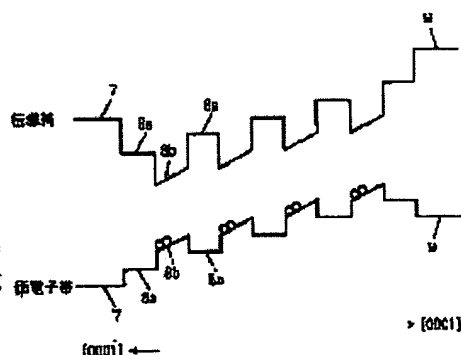
(72)Inventor : HATA MASAYUKI  
HAYASHI NOBUHIKO

## (54) LIGHT EMITTING ELEMENT

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a light emitting element with high light emission efficiency and a low operation current or a low threshold current.

SOLUTION: A p-type impurity is doped having in the vicinity of an interface in the [000-1] direction in a quantum well layer 8b or is doped heavily near an interface in the [000-1] direction in a barrier layer 8a. Or an n-type impurity may be doped heavily near an interface in the [0001] direction in a quantum well layer 8b or doped heavily near an interface in the [0001] direction in a barrier layer 8a. In this way, at least p-type or n-type impurity is added uniformly in the light emitting layer in the quantum well structure, so that the potential generated by piezoelectric effect in the confinement direction can be reduced in the quantum well structure. Then, the isolation between electrons and holes injected as a current can be restricted, and a decrease in luminous efficiency and the increase in operation current or threshold current can be reduced.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

12.07.2005

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号  
特開2000-277868  
(P2000-277868A)

(43)公開日 平成12年10月6日(2000.10.6)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テ-マ-コ-ト*(参考)	
H 0 1 S 5/343		H 0 1 S 3/18	6 7 7	5 F 0 4 1
H 0 1 L 33/00		H 0 1 L 33/00	C	5 F 0 7 3
			D	
			B	
H 0 1 S 5/22		H 0 1 S 3/18	6 6 2	
審査請求 未請求 請求項の数18 O L (全 21 頁) 最終頁に続く				

(21)出願番号 特願平11-82510

(22)出願日 平成11年3月25日(1999.3.25)

(71)出願人 000001889

三洋電機株式会社

大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号

(72)発明者 畑 雅幸

大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号 三  
洋電機株式会社内

(72)発明者 林 伸彦

大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号 三  
洋電機株式会社内

(74)代理人 100098305

弁理士 福島 祥人

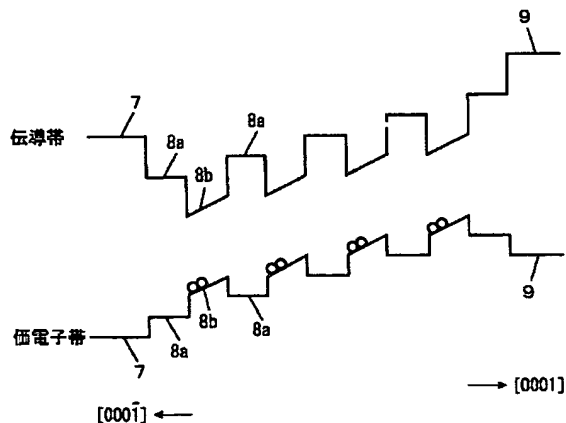
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 発光素子

(57)【要約】

【課題】 発光効率が高く動作電流またはしきい値電流が低い発光素子を提供することである。

【解決手段】 p型不純物を量子井戸層8b中の[000-1]方向側の界面近くに多くドーピングするかまたは障壁層8a中で量子井戸層8bの[000-1]方向側の界面近くに多くドーピングする。あるいは、n型不純物を量子井戸層8b中の[0001]方向側の界面近くに多くドーピングするかまたは障壁層8a中で量子井戸層8bの[0001]方向側の界面近くに多くドーピングする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 圧電効果の発生を伴う歪を有する 1 つ以上の井戸層と、前記井戸層を挟むように配置された 2 つ以上の障壁層とから構成される量子井戸構造の発光層を備え、前記量子井戸構造の発光層中に p 型不純物および n 型不純物のうち少なくとも一方の不純物が前記量子井戸構造の閉じ込め方向に圧電効果の結果として発生する電位勾配を低減するように不均一に添加されたことを特徴とする発光素子。

【請求項 2】 前記井戸層内において、圧電効果の結果として発生する電位の高い側に電位の低い側に比べて p 型不純物が多く添加されたことを特徴とする請求項 1 記載の発光素子。

【請求項 3】 前記井戸層内において、圧電効果の結果として発生する電位の低い側に電位の高い側に比べて n 型不純物が多く添加されたことを特徴とする請求項 1 または 2 記載の発光素子。

【請求項 4】 前記障壁層内において、圧電効果の結果として発生する電位の高い側の前記井戸層の界面と接する部分に電位の低い側の前記井戸層の界面と接する部分に比べて p 型不純物が多く添加されたことを特徴とする請求項 1 ～ 3 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 5】 前記障壁層内において、圧電効果の結果として発生する電位の低い側の前記井戸層の界面と接する部分に電位の高い側の前記井戸層の界面と接する部分に比べて n 型不純物が多く添加されたことを特徴とする請求項 1 ～ 4 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 6】 前記量子井戸構造の発光層中に p 型不純物および n 型不純物の両方が添加されたことを特徴とする請求項 1 ～ 5 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 7】 前記 p 型不純物の濃度と前記 n 型不純物の濃度とがほぼ等しいことを特徴とする請求項 6 記載の発光素子。

【請求項 8】 前記量子井戸構造の発光層は量子細線構造を有することを特徴とする請求項 1 ～ 7 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 9】 前記量子井戸構造の発光層は量子箱構造を有することを特徴とする請求項 1 ～ 7 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 10】 前記井戸層を構成する材料の結晶構造はウルツ鉱構造であることを特徴とする請求項 1 ～ 9 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 11】 前記量子井戸構造の閉じ込め方向はほぼ (0001) 方向であることを特徴とする請求項 10 記載の発光素子。

【請求項 12】 前記井戸層を構成する材料の結晶構造は閃亜鉛鉱構造であることを特徴とする請求項 1 ～ 9 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 13】 前記量子井戸構造の閉じ込め方向はほぼ (111) 方向であることを特徴とする請求項 12 記

載の発光素子。

【請求項 14】 前記圧電効果の発生を伴う歪は、前記量子井戸構造の閉じ込め方向に前記井戸層を伸長する歪を含むことを特徴とする請求項 1 ～ 13 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 15】 前記圧電効果の発生を伴う歪は、前記量子井戸構造の閉じ込め方向に前記井戸層を圧縮する歪を含むことを特徴とする請求項 1 ～ 13 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 16】 前記井戸層を構成する材料は III-V 族化合物半導体であることを特徴とする請求項 1 ～ 15 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 17】 前記 III-V 族化合物半導体は、ホウ素、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも 1 つを含む窒化物系半導体であることを特徴とする請求項 16 記載の発光素子。

【請求項 18】 前記井戸層を構成する材料は II-VI 族化合物半導体または I-VII 族化合物半導体であることを特徴とする請求項 1 ～ 15 のいずれかに記載の発光素子。

## 【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、圧電効果を有する材料により形成される発光素子に関する。

【0002】

【従来の技術】 GaN、GaInN、AlGaInN 等の III 族窒化物半導体（以下、窒化物系半導体と呼ぶ。）を用いた半導体レーザ素子、発光ダイオード等の半導体発光素子は、可視から視外にわたる領域の光を発生する発光素子として応用が期待されている。

【0003】 これらの応用の中で、GaInN 量子井戸層を発光層とする半導体発光素子の実用化に向けて開発が盛んに行われている。このような半導体発光素子は、サファイア、炭化ケイ素等の基板の (0001) 面上に、MOVPE 法（有機金属気相成長法）や MBE 法（分子線エピタキシャル成長法）により作製されている。

【0004】 図 37 は従来の GaN 系半導体発光素子の構成を示す模式的断面図である。図 37 の半導体発光素子は、特開平 6-268257 号公報に開示されている。

【0005】 図 37 において、サファイア基板 61 上に、GaN からなるバッファ層 62、n-GaN からなる n-コンタクト層 63、多重量子井戸構造を有する発光層 64、および p-GaN からなる p-キャップ層 65 が順に形成されている。発光層 64 は、組成の異なる GaInN からなる複数の障壁層 64a および量子井戸層 64b が交互に積層されてなる。

【0006】 このような従来の半導体発光素子の製造方法では、通常、ほぼ (0001) 面を主面とするサファ

イア基板61を用い、例えばMOVPE法により、サファイア基板上にバッファ層62からp-キャップ層65までの各層を順次形成する。この際、n-コンタクト層63からp-キャップ層65までの各層は、窒化物系半導体の[0001]方向に結晶成長する。

#### 【0007】

【発明が解決しようとする課題】ところで、一般的に閃亜鉛鉱構造、ウルツ鉱構造等の対称中心を持たない結晶では、歪により圧電効果が発生することがある。例えば、閃亜鉛鉱構造では、[111]軸に関して圧縮または伸長する歪において圧電効果が最も大きくなる。また、ウルツ鉱構造では、[0001]軸に関して圧縮または伸長する歪において圧電効果が最も大きくなる。

【0008】上記の従来の半導体発光素子において、GaNからなる発光層64は、(0001)面を主面とする量子井戸構造を有する。GaNからなる量子井戸層64bの格子定数は、n-GaNからなるn-コンタクト層63の格子定数よりも大きいので、量子井戸層64bには量子井戸の面内方向(界面に平行な方向)に圧縮歪が加わり、量子井戸の閉じ込め方向(界面に垂直な方向)には引張り歪が加わる。その結果、圧電効果に伴う電位勾配が量子井戸層64b中に発生し、[0001]方向側の電位が低く、[000-1]方向側の電位が高くなる。この場合の量子井戸構造の発光層64のエネルギーバンドを図38に示す。なお、図38には、5層の障壁層64aおよび4層の量子井戸層64bが示される。

【0009】図38に示すように、発光層64内の量子井戸層64bに電位勾配が発生するため、図39に示すように、注入された電流による電子と正孔とが空間的に分離する。その結果、半導体発光素子において、発光効率が低下する。特に、半導体レーザ素子においては、しきい値電流が高くなる。

【0010】発光層64の量子井戸層64bに不純物を添加すると、キャリアの移動により電位勾配が減少する効果が現れる。しかし、量子井戸層64bにp型不純物およびn型不純物の両方が添加されると、キャリアが補償され、キャリア濃度が低下する。それにより、キャリアの移動により電位勾配が減少する効果が小さくなる。特に、量子井戸層64bに添加されたp型不純物の濃度とn型不純物の濃度とがほぼ等しい場合には、キャリアの移動により電位勾配が減少する効果がさらに小さくなる。

【0011】このような現象は、閃亜鉛鉱構造やウルツ鉱構造等の他のIII-V族化合物半導体(例えばGaN系半導体、GaAs系半導体またはInP系半導体)、II-VI族半導体、I-VII族半導体においても発生する。特に、窒化物系半導体では圧電効果が大きいので、圧電効果により発生する電位勾配が大きくなり、発光効率の低下やしきい値電流および動作電流の上昇が顕

著に現れる。

【0012】本発明の目的は、発光効率がよく動作電流またはしきい値電流が低い発光素子を提供することである。

#### 【0013】

【課題を解決するための手段および発明の効果】本発明に係る発光素子は、圧電効果の発生を伴う歪を有する1つ以上の井戸層と、井戸層を挟むように配置された2つ以上の障壁層とから構成される量子井戸構造の発光層を備え、量子井戸構造の発光層中にp型不純物およびn型不純物のうち少なくとも一方の不純物が量子井戸構造の閉じ込め方向に圧電効果の結果として発生する電位勾配を低減するように不均一に添加されたものである。

【0014】本発明に係る発光素子においては、量子井戸構造の発光層中にp型不純物およびn型不純物のうち少なくとも一方の不純物が不均一に添加されることにより、量子井戸構造の閉じ込め方向に圧電効果のために発生する電位勾配が低減される。それにより、電流として注入される電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下および動作電流またはしきい値電流の上昇が抑制される。

【0015】発光層は、2つ以上の井戸層と、井戸層を挟む3つ以上の障壁層とにより構成される多重量子井戸構造を有してもよい。また、発光層は、1つの井戸層と、井戸層を挟む2つの障壁層とにより構成される単一量子井戸構造を有してもよい。

【0016】井戸層内において、圧電効果の結果として発生する電位の高い側に電位の低い側に比べてp型不純物が多く添加されてもよい。

【0017】この場合、量子井戸構造の閉じ込め方向に正孔の移動が生じ、正孔とイオン化したp型不純物とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した井戸層の電位勾配が減少する。

【0018】井戸層内において、圧電効果の結果として発生する電位の低い側に電位の高い側に比べてn型不純物が多く添加されてもよい。

【0019】この場合、量子井戸構造の閉じ込め方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したn型不純物とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した井戸層の電位勾配が減少する。

【0020】障壁層内において、圧電効果の結果として発生する電位の高い側の井戸層の界面と接する部分に電位の低い側の井戸層の界面と接する部分に比べてp型不純物が多く添加されてもよい。

【0021】この場合、量子井戸構造の閉じ込め方向に正孔の移動が生じ、正孔とイオン化したp型不純物とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した井戸層の電位勾配が減少する。

【0022】障壁層内において、圧電効果の結果として発生する電位の低い側の井戸層の界面と接する部分に電

位の高い側の井戸層の界面と接する部分に比べて n 型不純物が多く添加されてもよい。

【0023】この場合、量子井戸構造の閉じ込め方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化した n 型不純物とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した井戸層の電位勾配が減少する。

【0024】量子井戸層構造の発光層中に p 型不純物および n 型不純物の両方が添加されてもよい。この場合、電子と正孔とが補償され、ドーピングによるキャリアはほとんど発生しないが、イオン化した p 型不純物とイオン化した n 型不純物とにより圧電効果のために発生した電位勾配が減少する。

【0025】p 型不純物の濃度と n 型不純物の濃度とがほぼ等しくてもよい。この場合には、キャリアが補償されやすいが、電位勾配が減少する効果は大きい。

【0026】量子井戸構造の発光層は量子細線構造を有してもよい。量子細線構造を有する発光層においては、電位勾配方向に関して p 型不純物および n 型不純物のうち少なくとも一方の不純物が不均一に添加されることにより、量子細線構造の発光層において発生した電位勾配が減少する。

【0027】量子井戸構造の発光層は量子箱構造を有してもよい。量子箱構造を有する発光層においては、電位勾配方向に関して p 型不純物および n 型不純物のうち少なくとも一方の不純物が不均一に添加されることにより、量子箱構造の発光層において発生した電位勾配が減少する。

【0028】井戸層を構成する材料の結晶構造はウルツ鉱構造であってもよい。ウルツ鉱構造の結晶においては、歪により圧電効果が発生する。したがって、量子井戸構造の発光層中に p 型不純物および n 型不純物のうち少なくとも一方の不純物が不均一に添加されることにより、圧電効果のために発生した井戸層の電位勾配が減少する。

【0029】量子井戸構造の閉じ込め方向はほぼ (0001) 方向であってもよい。ウルツ鉱構造の結晶では、(0001) 軸に関して圧縮または伸張する歪による圧電効果が最も大きくなるので、不純物を不均一に添加することによる電位勾配の減少の効果が顕著に現れる。

【0030】井戸層を構成する材料の結晶構造は閃亜鉛鉱構造であってもよい。閃亜鉛鉱構造の結晶においては、歪により圧電効果が発生する。したがって、量子井戸構造の発光層中に p 型不純物および n 型不純物のうち少なくとも一方の不純物が不均一に添加されることにより、圧電効果のために発生した井戸層の電位勾配が減少する。

【0031】量子井戸構造の閉じ込め方向はほぼ (111) 方向であってもよい。閃亜鉛鉱構造の結晶では、(111) 軸に関して圧縮または伸張する歪による圧電効果が最も大きくなるので、不純物を不均一に添加する

ことによる電位勾配の減少の効果が顕著に現れる。

【0032】圧電効果の発生を伴う歪は、量子井戸構造の閉じ込め方向に井戸層を伸長する歪を含んでもよい。この場合には、量子井戸構造の閉じ込め方向に井戸層を伸長する歪により圧電効果が発生する。したがって、量子井戸構造の発光層中に p 型不純物および n 型不純物のうち少なくとも一方の不純物が不均一に添加されることにより、圧電効果のために発生する電位勾配が低減される。

10 【0033】圧電効果の発生を伴う歪は、量子井戸構造の閉じ込め方向に井戸層を圧縮する歪を含んでもよい。この場合には、量子井戸構造の閉じ込め方向に井戸層を圧縮する歪により圧電効果が発生する。したがって、量子井戸構造の発光層中に p 型不純物および n 型不純物のうち少なくとも一方の不純物が不均一に添加されることにより、圧電効果のために発生する電位勾配が低減される。

20 【0034】井戸層を構成する材料は III-V 族化合物半導体であってもよい。また、III-V 族化合物半導体は、ホウ素、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも 1 つを含む窒化物系半導体であってもよい。特に、窒化物系半導体では圧電効果が大きいため、圧電効果により発生する電位勾配が大きくなる。したがって、不純物を不均一に添加することによる電位勾配の減少の効果が顕著に現れる。

30 【0035】井戸層を構成する材料は II-VI 族化合物半導体または I<sub>3</sub>-VII 族化合物半導体であってもよい。この場合にも、不純物を不均一に添加することにより、圧電効果のために電位勾配を低減することができる。

【0036】

【発明の実施の形態】 (A) 第 1 の実施の形態

第 1 の実施の形態の発光素子は、GaInN からなる量子井戸層および GaN からなる障壁層から構成される

(0001) 面を主面とするウルツ鉱構造の MQW 発光層 (多重量子井戸構造の発光層) を有する。この量子井戸層は、量子井戸の面内方向 (界面に平行な方向) に圧縮歪を有し、量子井戸の閉じ込め方向 (界面に垂直な方向) に伸長する歪を有する。このような GaInN からなる量子井戸層中には、圧電効果により電位勾配が形成される。

40 【0037】III-V 族化合物半導体の場合、この電位勾配において [000-1] 方向側の電位が高く、[0001] 方向側の電位が低い。圧電効果のために発生した電位勾配を減少させるためには、p 型不純物を量子井戸層中の [000-1] 方向側の部分に多くドーブし、または障壁層中で量子井戸層の [000-1] 方向側の界面と接する部分に多くドーブする。あるいは、n 型不純物を量子井戸層中の [0001] 方向側の部分に多くドーブし、または障壁層中で量子井戸層の [0001] 方向側の界面と接する部分に多くドーブする。

【0038】図1は本発明の第1～第7の実施例における半導体レーザ素子の構成を示す模式的斜視図である。図1の半導体レーザ素子においては、GaInNからなるMQW発光層が用いられる。

【0039】図1において、サファイア基板1の(0001)面上に厚さ15nm程度のAlGaInNからなるバッファ層2が形成されている。このバッファ層2上に、厚さ0.5μm程度のアンドープGaInN層3、厚さ4μm程度のn-GaInNからなるn-コンタクト層4、厚さ0.1μm程度のn-GaInNからなるn-クラック防止層5、厚さ0.45μm程度のn-AlGaInNからなるn-第1クラッド層6、厚さ50nm程度のn-GaInNからなるn-第2クラッド層7、およびGaInNからなるMQW発光層8が順に形成されている。

【0040】MQW発光層8上に、厚さ40nm程度のp-GaInNからなるp-第1クラッド層9、厚さ0.45μm程度のp-AlGaInNからなるp-第2クラッド層10、厚さ50nm程度のp-GaInNからなるp-キャップ層11が順に形成されている。

【0041】p-キャップ層11上には、厚さ0.2μm程度のシリコン窒化物からなる電流狭窄層(電流ブロック層)14が形成されている。電流狭窄層14は、幅2μm程度のストライプ状開口部を有し、このストライプ状開口部が電流通路13となる。

【0042】電流狭窄層14のストライプ状開口部内およびp-キャップ層11上および電流狭窄層14上には、厚さ3～5μmのp-GaInNからなるp-コンタクト層12が形成されている。アンドープGaInN層3からp-コンタクト層12までの各層はウルツ鉱構造を有し、これらの窒化物系半導体の[0001]方向に成長している。

【0043】p-コンタクト層12からn-コンタクト層4までの一部領域が除去され、n-コンタクト層4の表面が露出している。それにより、幅約10μmのメサ形状が形成されている。p-コンタクト層12上にp電極15が形成され、n-コンタクト層4の露出した表面上にn電極16が形成されている。

【0044】図2は図1の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0045】図2に示すようにMQW発光層8は、厚さ4nm程度のGaInNからなる障壁層8aと厚さ4nm程度のGaInNからなる量子井戸層8bとが交互に積層されてなる多重量子井戸構造を有する。例えば、GaInNからなる障壁層8aの数は5であり、GaInNからなる量子井戸層8bの数は4である。

【0046】ここで、厚さ0.5μm程度のアンドープGaInN層3および厚さ4μm程度のn-GaInNからなるn-コンタクト層4の格子定数に比べて、GaInNからなる量子井戸層8bの格子定数が大きいので、量子井戸の面内方向(界面に平行な方向)に圧縮歪が発生し、

量子井戸の閉じ込め方向(界面に垂直な方向)に伸長する歪が発生する。その結果、MQW発光層8内の量子井戸層8bに圧電効果に伴う電位勾配が形成され、MQW発光層8内のエネルギーバンドは図2に示す構造となる。

【0047】以下の第1～第7の実施例では、量子井戸層8bに形成される電位勾配を低減するために、MQW発光層8中にp型不純物およびn型不純物の少なくとも一方が不均一に添加される。

#### 10 【0048】(1) 第1の実施例

図3および図4は第1の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0049】図3に示すように、p型不純物として例えばMgが量子井戸層8b中の[000-1]方向側つまりn-第2クラッド層7側に多くドーブされている。具体的には、量子井戸層8b中のn-第2クラッド層7側の厚さ約2nmの部分にのみMgがドーブされ、量子井戸層8b中のp-第1クラッド層9側の厚さ約2nmの部分にMgはドーブされていない。

20 【0050】Mgのドーブ量としては、 $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ が好ましい。p型不純物の不均一なドーピングの方法としては、これ以外の方法を用いてもよい。例えば、量子井戸層8b中のn-第2クラッド層7側の界面から深さ約1nmの部分に $2 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 程度の濃度にp型不純物をデルタドーピングしてもよい。p型不純物として、Mg以外にBe、Ca、Sr、Ba、Zn、Cd、Hg等を用いてもよい。

30 【0051】本実施例では、図3に示すようにp型不純物として例えばMgが量子井戸層8b中の[000-1]方向側つまりn-第2クラッド層7側に多くドーブされているので、図4に示すように[0001]方向に正孔の移動が生じ、正孔とイオン化したp型不純物とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層8bの電位勾配が減少し、エネルギーバンドの勾配も減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

#### 【0052】(2) 第2の実施例

40 図5および図6は第2の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0053】図5に示すように、n型不純物として例えばSiが量子井戸層8b中の[0001]方向側つまりp-第1クラッド層9側に多くドーブされている。具体的には、量子井戸層8b中のp-第1クラッド層9側の厚さ約2nmの部分にのみSiがドーブされ、量子井戸層8b中のn-第2クラッド層7側の厚さ約2nmの部分にSiはドーブされていない。

50 【0054】Siのドーブ量としては、 $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ が好ましい。n型不純物の不均一なドーピングの方法としては、これ以外の方法を用いてもよ

い。例えば、量子井戸層8b中のp-第1クラッド層9側の界面から深さ約1nmの部分に $2 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 程度の濃度にn型不純物をデルタドーピングしてもよい。n型不純物として、Si以外にGe、Pb、S、Se、Te等を用いてもよい。

【0055】本実施例では、図5に示すようにn型不純物として例えばSiが量子井戸層8b中の【0001】方向側つまりp-第1クラッド層9側に多くドーピングされているので、図6に示すように【000-1】方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したn型不純物とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層8bの電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

#### 【0056】(3) 第3の実施例

図7および図8は第3の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0057】図7に示すように、p型不純物として例えばMgが障壁層8a中で量子井戸層8bの【000-1】方向側つまりn-第2クラッド層7側の界面と接する部分に多くドーピングされている。具体的には、障壁層8a中で量子井戸層8bのn-第2クラッド層7側の界面と接する厚さ約2nmの部分にのみMgがドーピングされ、障壁層8a中で量子井戸層8bのp-第1クラッド層9側の界面と接する厚さ約2nmの部分にMgはドーピングされていない。

【0058】Mgのドーピング量としては、 $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ が好ましい。p型不純物の不均一なドーピングの方法としては、これ以外の方法を用いてもよい。例えば、障壁層8a中で量子井戸層8bのn-第2クラッド層7側の界面から深さ約1nmの部分に $2 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 程度の濃度にp型不純物をデルタドーピングしてもよい。p型不純物として、Mg以外にBe、Ca、Sr、Ba、Zn、Cd、Hg等を用いてもよい。

【0059】本実施例では、図7に示すようにp型不純物として例えばMgが障壁層8a中で量子井戸層8bの【000-1】方向側つまりn-第2クラッド層7側の界面と接する部分に多くドーピングされているので、図8に示すように【0001】方向に正孔の移動が生じ、正孔とイオン化したp型不純物とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層8bの電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

#### 【0060】(4) 第4の実施例

図9および図10は第4の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0061】図9に示すように、n型不純物として例え

ばSiが障壁層8a中で量子井戸層8bの【0001】方向側つまりp-第1クラッド層9側の界面と接する部分に多くドーピングされている。具体的には、障壁層8a中で量子井戸層8bのp-第1クラッド層9側の界面と接する厚さ約2nmの部分にのみSiがドーピングされ、障壁層8a中で量子井戸層8bのn-第2クラッド層7側の界面と接する厚さ約2nmの部分にSiはドーピングされていない。

【0062】Siのドーピング量としては、 $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ が好ましい。n型不純物の不均一なドーピングの方法としては、これ以外の方法を用いてもよい。例えば、障壁層8a中で量子井戸層8bのp-第1クラッド層9側の界面から深さ約1nmの部分に $2 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 程度の濃度にn型不純物をデルタドーピングしてもよい。n型不純物として、Si以外にGe、Pb、S、Se、Te等を用いてもよい。

【0063】本実施例では、図9に示すようにn型不純物として例えばSiが障壁層8a中で量子井戸層8bの【0001】方向側つまりp-第1クラッド層9側の界面と接する部分に多くドーピングされているので、図10に示すように【000-1】方向に電子の移動が生じ、電子とイオン化したn型不純物とが空間的に分離する。それにより、圧電効果のために発生した量子井戸層8bの電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0064】上記第1～第4の実施例におけるドーピング方法は、それぞれ単独で用いても効果が得られるが、2つ以上の実施例のドーピング方法を組み合わせてもよい。例えば、第1および第3の実施例を組み合わせてもよく、第1、第2および第3の実施例を組み合わせてもよく、第1、第2、第3および第4の実施例を組み合わせてもよい。

#### 【0065】(5) 第5の実施例

図11および図12は第5の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0066】第5の実施例は、図11に示すように、第1の実施例と第2の実施例とを組み合わせたものである。本実施例では、p型不純物であるMgおよびn型不純物であるSiのドーピング濃度がほぼ等しい場合について示している。

【0067】本実施例では、図12に示すように、電子と正孔とが補償され、ドーピングによるキャリアはほとんど発生しないが、イオン化したp型不純物とイオン化したn型不純物とにより、圧電効果のために発生した電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0068】したがって、特に、MQW発光層8中にp型不純物およびn型不純物の両方を添加する場合に、そ

これらのp型不純物およびn型不純物を不均一に添加することにより、キャリアが補償されても、電位勾配が減少する効果は大きい。また、MQW発光層8中に添加されたp型不純物の濃度とn型不純物の濃度とがほぼ等しい場合には、さらにキャリアが補償されやすいが、電位勾配が減少する効果は大きい。

【0069】なお、例えば第1および第4の実施例を組み合わせた場合、第2および第3の実施例を組み合わせた場合においても、第5の実施例と同等の効果が生じる。

#### 【0070】(6) 第6の実施例

図13および図14は第6の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0071】第6の実施例は、図13に示すように、第3の実施例と第4の実施例とを組み合わせたものである。本実施例では、p型不純物であるMgおよびn型不純物であるSiのドーピング濃度がほぼ等しい場合について示している。

【0072】本実施例では、図14に示すように、電子と正孔とが補償され、ドーピングによるキャリアはほとんど発生しないが、イオン化したp型不純物とイオン化したn型不純物とにより、圧電効果のために発生した電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0073】本実施例では、量子井戸層8b中にp型不純物およびn型不純物がドーピングされていない。したがって、第5の実施例の効果に加えて、量子井戸層8bへのドーピングによる不純物準位または発光センターによる発光を低減できるという効果も得られる。それにより、本実施例のMQW発光層8を発光ダイオードに適用した場合には、発光スペクトル幅を狭くすることができる。その結果、色純度を向上させることが可能となる。

#### 【0074】(7) 第7の実施例

図15および図16は第7の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0075】第7の実施例では、図15に示すように、p型不純物として例えばMgが不均一にドーピングされた第1の実施例の量子井戸層8b中に、n型不純物として例えばSiが均一にドーピングされている。Siのドーピング濃度は、 $5 \times 10^{16} \sim 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ である。

【0076】本実施例では、図15に示すようにp型不純物として例えばMgが量子井戸層8b中の[000-1]方向側つまりn-第2クラッド層7側に多くドーピングされ、n型不純物として例えばSiが量子井戸層8b中に均一にドーピングされているので、図16に示すように電子および正孔は補償され、ドーピングによるキャリアはほとんど発生しないが、イオン化したp型不純物およびn型不純物により圧電効果のために発生した電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔

との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0077】なお、例えば第3の実施例の量子井戸層8b中にn型不純物を均一にドーピングした場合、第2または第4の実施例の量子井戸層8b中にp型不純物を均一にドーピングした場合においても、第7の実施例と同等の効果が生じる。

#### 【0078】○図1の半導体レーザ素子の製造方法

図17～図21は図1の半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【0079】図1の半導体レーザ素子の各窒化物系半導体層は、MOVPE法によりサファイア基板1上に形成される。原料ガスとしては、例えばトリメチルアルミニウム(TMA1)、トリメチルガリウム(TMGa)、トリメチルインジウム(TMIn)、NH<sub>3</sub>、SiH<sub>4</sub>、シクロペンタジエニルマグネシウム(Cp<sub>2</sub>Mg)を用いる。

【0080】まず、図17に示すように、基板温度を600℃に保ち、サファイア基板1上に厚さ15nm程度のバッファ層2を形成する。次に、基板温度を1150℃に保ち、厚さ0.5μm程度のアンドープGaN層3、厚さ4μm程度のSiドーピングGaNからなるn-コンタクト層4を形成する。さらに、基板温度を880℃に保ち、厚さ0.1μm程度のSiドーピングGa<sub>0.95</sub>In<sub>0.05</sub>Nからなるn-クラッド防止層5を形成する。次に、基板温度を1150℃に保ち、厚さ0.45μm程度のSiドーピングAl<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>Nからなるn-第1クラッド層6、および厚さ50nm程度のSiドーピングGaNからなるn-第2クラッド層7を形成する。

【0081】さらに、基板温度を880℃に保ち、厚さ4nm程度のアンドープGaNからなる5層の障壁層8aと厚さ4nm程度のアンドープのGa<sub>0.85</sub>In<sub>0.15</sub>Nからなる4層の量子井戸層8bを交互に積層し、GaInNからなるMQW発光層8を形成する。この際、第1～第7の実施例に従って、MQW発光層8中にp型不純物またはn型不純物をドーピングする。

【0082】最後に、基板温度を1150℃に保ち、厚さ40nm程度のMgドーピングGaNからなるp-第1クラッド層9、厚さ0.45μm程度のMgドーピングAlGa<sub>0.95</sub>Nからなるp-第2クラッド層10、厚さ50nm程度のMgドーピングGaNからなるp-キャップ層11を形成する。上記のバッファ層2からp-キャップ層11までの各層は、大気圧のMOVPE法により形成する。

【0083】その後、図18に示すように、p-キャップ層11上の全面に、例えばECR(電子サイクロトロン共鳴)プラズマCVD法により、厚さ0.2μm程度のSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>等のシリコン窒化物からなる電流狭窄層14を形成する。次に、フォトリソグラフィおよびBHf(緩衝フッ酸)によるウェットエッチングで、幅2μm程度のストライプ状の領域のシリコン窒化物を除去し、



p-キャップ層11を露出させる。それにより、ストライプ状の電流通路13が形成される。

【0084】次に、図19に示すように、例えば76 Torrの減圧MOVPE法により、n-電流狭窄層14上およびストライプ状開口部内のp-キャップ層11上に厚さ3~5 μmのMgドープGaNからなるp-コンタクト層12を形成する。この際、p-キャップ層11の露出した部分に選択的にp-GaNが成長するように、成長条件を適切に調整する。例えば、基板温度を約100℃上昇させ、NH<sub>3</sub>の流量を約3倍に増加させる。

【0085】このような条件下で成長を行うと、まずp-キャップ層11の露出した部分にp-GaNが成長し、電流通路13にあたる部分が形成される。一方、電流狭窄層14上にはp-GaNは結晶成長しない。引き続き結晶成長を継続すると、p-GaNが電流通路13上に成長するとともに、電流通路13上に成長したp-GaNの側面から横方向に結晶成長が開始し、電流狭窄層14上にp-GaNからなるp-コンタクト層12が形成される。例えば、電流通路13にあたる部分を中心として幅約8 μmでp-コンタクト層12が形成される。

【0086】この結果、p-キャップ層11とp-コンタクト層12とは幅2 μm程度のストライプ状の電流通路13で接続され、p-キャップ層11とp-コンタクト層12との間には、電流通路13の部分を除いて、厚さ0.2 μm程度のSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>からなる電流狭窄層14が形成される。

【0087】次に、図20に示すように、メタルマスクおよびEB（電子ビーム）蒸着法を用いて、p-コンタクト層12を含む領域に、例えば幅10 μm程度のストライプ形状で厚さ3~5 μm Ni膜を蒸着する。このNi膜をマスクとして用い、例えばCF<sub>4</sub>をエッチングガスとして用い、反応性イオンエッチング（RIE）法により、n-コンタクト層4が露出するまで、p-コンタクト層12からn-クラック防止層5までをメサ状にエッチングする。その後、マスクとして用いたNi膜を塩酸等を用いて除去する。

【0088】さらに、図21に示すように、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>等の絶縁膜17をECRプラズマCVD法、フォトリソグラフィおよびエッチングによりp-コンタクト層12からn-クラック防止層5までの側面および電極形成領域を除いたn-コンタクト層4の上面に形成する。そして、n-コンタクト層4の露出した表面上に、例えばAu/Tiからなるn電極16を形成し、p-コンタクト層12上に、Au/Pdからなるp電極15を形成する。

【0089】最後に、例えばへき開により、ストライプ状の電流通路13に沿った方向に共振器長300 μmの共振器構造を形成する。それにより、図1の構造を有す

る半導体レーザ素子が作製される。

【0090】なお、半導体レーザ素子の共振器面にSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>等を積層した誘電体多層膜等の端面高反射膜や低反射膜を形成してもよい。

【0091】（8）第8の実施例

第8の実施例の半導体レーザ素子は、図1の半導体レーザ素子と同じ構造を有し、以下に示すように窒化物系半導体層の結晶成長方法が異なる。

【0092】図1の半導体レーザ素子の構造において、サファイア基板1の（0001）面上に、MOVPE法により、少なくともバッファ層2を低温でかつアンドープGaN層3を高温で結晶成長させた後、他の層4~12、14を例えばMBE法（分子線エピタキシ法）やHVPE法（ハライド気相成長法）等のMOVPE法以外の結晶成長方法で結晶成長させる。MQW発光層8の構造は、上記の第1~第7の実施例と同様である。

【0093】本実施例において、アンドープGaN層3からp-コンタクト層12までの各層はウルツ鉱構造であり、窒化物系半導体の〔0001〕方向に成長している。したがって、第1~第7の実施例と同じ効果が得られる。

【0094】このように、サファイア基板1の（0001）面上に、MOVPE法により低温でバッファ層2を成長させた後に、引き続いて高温で窒化物系半導体層を結晶成長させると、窒化物系半導体層は〔0001〕方向に成長し、その後、結晶成長方法を変えても結晶成長の方位は変化せず、〔0001〕方向に成長し続ける。

【0095】（9）第9の実施例

第9の実施例の半導体レーザ素子は、図1の半導体レーザ素子と同じ構造を有し、以下に示すように、窒化物系半導体層の結晶成長方法が異なる。

【0096】図1の半導体レーザ素子の構造において、サファイア基板1の（0001）面上に、MBE法により、少なくともバッファ層2を低温でかつアンドープGaN層3を高温で結晶成長させた後、他の層4~12、14を他の結晶成長方法（例えばHVPE法、MOVPE法等）あるいは引き続きMBE法により結晶成長させる。

【0097】本実施例において、アンドープGaN層3からp-コンタクト層12までの各層はウルツ鉱構造を有し、窒化物系半導体の〔000-1〕方向に成長している。このため、MQW発光層8の電位勾配の向きが第1~第8の実施例と反対になる。

【0098】図22および図23は第9の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層8のエネルギーバンド図である。

【0099】図22に示すように、n型不純物として例えばSiが障壁層8a中で量子井戸層8bの〔0001〕方向側つまりn-第2クラッド層7側の界面と接す

る部分に多くドーピングされ、p型不純物として例えばMgが障壁層8a中で量子井戸層8bの[000-1]方向側つまりp-第1クラッド層9側の界面と接する部分に多くドーピングされ、変調ドーピング構造となっている。本実施例では、n型不純物およびp型不純物のドーピング濃度がほぼ等しい場合について示している。

【0100】本実施例では、図23に示すように、電子および正孔が補償され、ドーピングによるキャリアはほとんど発生しないが、イオン化したp型不純物とイオン化したn型不純物とにより、圧電効果のために発生した電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0101】したがって、特に、MQW発光層8中にp型不純物およびn型不純物の両方を添加する場合に、それらのp型不純物およびn型不純物を不均一に添加することにより、キャリアが補償されても、電位勾配が減少する効果は大きい。また、MQW発光層8中に添加されたp型不純物の濃度とn型不純物の濃度とがほぼ等しい場合には、さらにキャリアが補償されやすいが、電位勾配が減少する効果は大きい。

【0102】MQW発光層8の構造として、第1～第7の実施例の構造を用いる場合、第1～第7の実施例と同じ効果が得られる。

【0103】上記第1～第9の実施例では、基板としてサファイア基板1を用いているが、窒化物系半導体層がウルツ鉱構造であれば、スピネル、SiC、Si、GaAs、GaP、InP、GaN等の基板を用いてもよい。

【0104】また、上記第1～第9の実施例では、量子井戸の閉じ込め方向（界面に垂直な方向）に伸長する歪を有するウルツ鉱構造のMQW発光層8について説明したが、例えば、GaN基板上にAlGaNからなる量子井戸層およびAlGaInNからなる障壁層を含むMQW発光層を形成した場合には、量子井戸の閉じ込め方向（界面に垂直な方向）に圧縮する歪が発生する。この場合には、圧電効果による電位勾配において[0001]方向側の電位が高くなり、[000-1]方向側の電位が低くなる。したがって、p型不純物またはn型不純物のドーピングの分布位置を量子井戸層の中心における(0001)面に関して第1～第9の実施例と反対にすればよい。

【0105】さらに、ウルツ鉱型のZnSeを代表とするII-VI族化合物半導体を始めとするウルツ鉱構造または六方晶構造を有する半導体であれば同じ効果が得られる。ただし、II-VI族化合物半導体およびCuClを代表とするI-VII族化合物半導体の場合には、電位勾配が逆になる。

【0106】加えて、量子井戸の閉じ込め方向としては、歪により電位勾配の発生する方向であれば、量子井

戸層の面方位は(0001)面に限られるものではない。歪量子井戸の面方位が[0001]軸を面内に含む面方位以外であれば、いかなる面方位でも、歪により電位勾配が量子井戸の閉じ込め方向に発生する。すなわち、歪量子井戸の面方位が一般式(HKL0)面で表される面方位以外であれば、いかなる面方位でも、圧電効果が発生する。ここで、H、KおよびLは、 $H+K+L=0$ を満足し、かつ $H=K=L=0$ を除く任意の数である。上記の(HKL0)面は、例えば(1-100)面および(11-20)面である。特に、(0001)面を主面とする歪量子井戸において、量子井戸の閉じ込め方向に電位勾配を発生させる圧電効果が最も大きい。なお、歪により電位勾配の発生する量子井戸層の面方位については後述する。

【0107】(B)第2の実施の形態

第2の実施の形態の発光素子は、量子井戸層に歪を有する(111)面を主面とする閃亜鉛鉱構造のMQW発光層を有する。量子井戸の閉じ込め方向（界面に垂直な方向）に歪を有する場合、圧電効果により電位勾配が形成される。

【0108】III-V族化合物半導体において、量子井戸の面内方向（界面に平行な方向）に引張り歪を有し、量子井戸の閉じ込め方向（界面に垂直な方向）に圧縮する歪を有する場合、圧電効果のために発生した電位勾配において[111]方向側の電位が高く、[-1-1-1]方向側の電位が低い。この電位勾配を減少させるためには、p型不純物を量子井戸層中の[111]方向側の部分に多くドーピングし、または障壁層中で量子井戸層の[111]方向側の界面と接する部分に多くドーピングする。あるいは、n型不純物を量子井戸層中の[-1-1-1]方向側の部分に多くドーピングし、または障壁層中で量子井戸層の[-1-1-1]方向側の界面と接する部分に多くドーピングする。

【0109】逆に、III-V族化合物半導体において、量子井戸の面内方向（界面に平行な方向）に圧縮歪を有し、量子井戸の閉じ込め方向（界面に垂直な方向）に伸長する歪を有する場合、圧電効果のために発生した電位勾配において[-1-1-1]方向側の電位が高く、[111]方向側の電位が低い。この電位勾配を減少させるためには、p型不純物を量子井戸層中の[-1-1-1]方向側の部分に多くドーピングし、または障壁層中で量子井戸層の[-1-1-1]方向側の界面と接する部分に多くドーピングする。あるいは、n型不純物を量子井戸層中の[111]方向側の部分に多くドーピングし、または障壁層中で量子井戸層の[111]方向側の界面と接する部分に多くドーピングする。

【0110】一方、II-VI族化合物半導体およびI-VI族化合物半導体において、量子井戸の面内方向（界面に平行な方向）に引張り歪を有し、量子井戸の閉じ込め方向（界面に垂直な方向）に圧縮する歪を有する場合、

10

20

30

40

50

圧電効果のために発生した電位勾配において $[-1-1-1]$ 方向側の電位が高く、 $[111]$ 方向側の電位が低い。この電位勾配を減少させるためには、p型不純物を量子井戸層中の $[-1-1-1]$ 方向側の部分に多くドーピングし、または障壁層中で量子井戸層の $[-1-1-1]$ 方向側の界面と接する部分に多くドーピングする。あるいは、n型不純物を量子井戸層中の $[111]$ 方向側の部分に多くドーピングし、または障壁層中で量子井戸層の $[111]$ 方向側の界面と接する部分に多くドーピングする。

【0111】逆に、II-VI族化合物半導体およびI-VI族化合物半導体において、量子井戸の面内方向（界面に平行な方向）に圧縮歪を有し、量子井戸の閉じ込め方向（界面に垂直な方向）に伸長する歪を有する場合、圧電効果のために発生した電位勾配において $[111]$ 方向側の電位が高く、 $[-1-1-1]$ 方向側の電位が低い。この電位勾配を減少させるためには、p型不純物を量子井戸層中の $[111]$ 方向側の部分に多くドーピングし、または障壁層中で量子井戸層の $[111]$ 方向側の界面と接する部分に多くドーピングする。あるいは、n型不純物を量子井戸層中の $[-1-1-1]$ 方向側の部分に多くドーピングし、または障壁層中で量子井戸層の $[-1-1-1]$ 方向側の界面と接する部分に多くドーピングする。

【0112】量子井戸の閉じ込め方向としては、歪により電位勾配の発生する方向であれば、量子井戸層の面方位は $(111)$ 面と等価な面方位に限られるものではない。歪量子井戸の面方位が $[100]$ 軸を面内に含む面方位およびこれと等価な面方位以外であれば、いかなる面方位でも、歪により電位勾配が量子井戸の閉じ込め方向に発生する。すなわち、歪量子井戸の面方位が一般式 $(OMN)$ 面で表される面方位およびこれと等価な面方位以外であれば、いかなる面方位でも、圧電効果が発生する。ここで、MおよびNは、 $M=N=0$ を除く任意の数である。上記の $(OMN)$ 面は、例えば $(001)$ 面および $(011)$ 面である。特に、 $(111)$ 面を主面とする歪量子井戸において、量子井戸の閉じ込め方向に電位勾配を発生させる圧電効果が最も大きい。なお、歪により電位勾配の発生する量子井戸層の面方位については後述する。

【0113】(10)第10の実施例

図24は本発明の第10の実施例における埋め込みリッジ構造の $AlGaInP$ 系半導体レーザ素子の構造を示

す断面図である。図25および図26は第10の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【0114】図24において、 $n-GaAs$ 基板21は、面方位が $(111)A$ の結晶成長面を有する。 $n-GaAs$ 基板21上に $n-Ga_{0.51}In_{0.49}P$ からなる $n$ -バッファ層22、 $n-(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}P$ からなる $n$ -クラッド層23、およびMQW発光層24が順に形成されている。

【0115】MQW発光層24は、図25に示すように、 $(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.51}In_{0.49}P$ からなる光ガイド層24c上に $(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.45}In_{0.55}P$ からなる5層の圧縮歪障壁層24aおよび $Ga_{0.6}In_{0.4}P$ からなる4層の引張り歪井戸層24bが交互に積層されてなる。

【0116】MQW発光層24上には、 $(Al_{0.57}Ga_{0.43})_{0.51}In_{0.49}P$ からなる光ガイド層25および多重量子障壁層26が順に形成されている。多重量子障壁層26は、 $Ga_{0.51}In_{0.49}P$ からなる10層の井戸層および $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}P$ からなる10層の障壁層が交互に積層されてなる。この多重量子障壁層26は、温度特性の改善のために設けられている。

【0117】多重量子障壁層26上には、 $p-(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}P$ からなる $p$ -クラッド層27が形成されている。 $p$ -クラッド層27の上部領域はメサエッチング等によりストライプ状のリッジ部に形成されている。リッジ部の幅は $5\mu m$ である。 $p$ -クラッド層27のリッジ部上には $p-Ga_{0.51}In_{0.49}P$ からなる $p$ -コンタクト層28が形成されている。

【0118】 $p$ -クラッド層27の両側には、 $n-GaAs$ からなる $n$ -電流ブロック層29が形成され、 $p$ -コンタクト層28上および $n$ -電流ブロック層29上には $p-GaAs$ からなる $p$ -キャップ層30が形成されている。 $n-GaAs$ 基板21の下面に $n$ -電極32が形成され、 $p$ -キャップ層30の上面に $p$ -電極31が形成されている。

【0119】表1に図24の半導体レーザ素子における各層の材料および膜厚を示す。

【0120】

【表1】

		材料	膜厚
n-バンプ層22		$n\text{-Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	$0.3\mu\text{m}$
n-クラッド層23		$n\text{-(Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	$0.8\mu\text{m}$
MQW 活性層 24	光ガイド層 24c	$(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	50nm
	障壁層24a	$(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.45}\text{In}_{0.55}\text{P}$	各4nm
	井戸層24b	$\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$	各10nm
光ガイド層25		$(\text{Al}_{0.57}\text{Ga}_{0.43})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	30nm
多重量子 障壁層26	井戸層	$\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	各1.1nm
	障壁層	$(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	各1.7nm
p-クラッド層27		$p\text{-(Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	$0.8\mu\text{m}$
p-コンタクト層28		$p\text{-Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	$0.1\mu\text{m}$
n-電流ブロック層29		n-GaAs	$0.8\mu\text{m}$
p-キャップ層30		p-GaAs	$3\mu\text{m}$

【0121】この半導体レーザ素子において、n-GaAs基板21上の各層22～30はMOCVD法（有機金属化学的気相成長法）等により形成される。

【0122】圧縮歪障壁層24aの格子定数はn-GaAs基板21の格子定数よりも大きく設定されている。それにより、圧縮歪障壁層24aはn-GaAs基板21に対して圧縮歪を有する。引張り歪井戸層24bの格子定数はn-GaAs基板21の格子定数よりも小さく設定されている。それにより、引張り歪井戸層24bはn-GaAs基板21に対して引張り歪を有する。

【0123】図25に示すように、n型不純物として例えばSeが圧縮歪障壁層24a中で引張り歪井戸層24bの $[-1-1-1]$ 方向側つまり光ガイド層24c側の界面と接する部分に多くドーピングされ、p型不純物として例えばZnが圧縮歪障壁層24a中で引張り歪井戸層24bの $[111]$ 方向側つまり光ガイド層25側の界面と接する部分に多くドーピングされ、変調ドーピング構造となっている。本実施例では、n型不純物およびp型不純物のドーピング濃度がほぼ等しい場合について示している。

【0124】なお、本実施例では、MQW発光層24中の量子井戸面内に関して井戸層24bが引張り歪を有し、障壁層24aが圧縮歪を有するため、障壁層24aには井戸層24bとは反対の電位勾配が発生する。

【0125】本実施例では、図26に示すように、電子および正孔が補償され、ドーピングによるキャリアはほとんど発生しないが、イオン化したp型不純物とイオン化したn型不純物とにより引張り歪井戸層24bの電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0126】(11)第11の実施例

図27は本発明の第11の実施例におけるZnSe系半導体レーザ素子の構造を示す断面図である。図28および図29は第11の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【0127】図27において、n-GaAs基板41の $(111)$ B面上に、n-GaAsからなるn-第1バッファ層42、n-ZnSeからなるn-第2バッファ層43、n-Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>Se<sub>0.15</sub>からなるn-クラッド層44、およびMQW発光層45が順に形成されている。

【0128】MQW発光層45は、図28に示すように、Zn<sub>0.1</sub>Se<sub>0.9</sub>からなる5層の引張り歪障壁層45aおよびZn<sub>0.7</sub>Cd<sub>0.3</sub>Seからなる4層の圧縮歪井戸層45bが交互に積層されてなる。

【0129】MQW発光層45上には、p-Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>Se<sub>0.15</sub>Se<sub>0.85</sub>からなるp-クラッド層46が形成されている。p-クラッド層46の上部領域はストライプ状のリッジ部となっている。

【0130】p-クラッド層46のリッジ部上には、p-ZnSeからなるp-コンタクト層48が形成され、p-クラッド層46のリッジ部およびp-コンタクト層48の両側にはSiO<sub>2</sub>膜47が形成されている。n-GaAs基板41の下面にn電極50が形成され、p-コンタクト層48上およびSiO<sub>2</sub>層47上にp電極49が形成されている。

【0131】表2に図27の半導体レーザ素子における各層の材料および膜厚を示す。

【0132】

【表2】

21

22

	材料	膜厚
n-第1バッファ層42	n-GaAs	1 $\mu$ m
n-第2バッファ層43	n-ZnSe	1 $\mu$ m
n-クラッド層44	n-Zn <sub>0.9</sub> Mg <sub>0.1</sub> Se <sub>0.85</sub>	1 $\mu$ m
MQW 活性層 45	引張り歪 障壁層45a	ZnS <sub>0.1</sub> Se <sub>0.9</sub>
	圧縮歪 井戸層45b	Zn <sub>0.7</sub> Cd <sub>0.3</sub> Se
p-クラッド層46	p-Zn <sub>0.9</sub> Mg <sub>0.1</sub> Se <sub>0.85</sub>	1 $\mu$ m
p-コンタクト層48	p-ZnSe	0.5 $\mu$ m
SiO <sub>2</sub> 層47	SiO <sub>2</sub>	0.5 $\mu$ m

【0133】図28に示すように、n型不純物として例えばC1が引張り歪障壁層45a中で圧縮歪井戸層45bの $[-1-1-1]$ 方向側つまりp-クラッド層46側の界面と接する部分に多くドーピングされ、p型不純物として例えば窒素が引張り歪障壁層45a中で圧縮歪井戸層45bの $[111]$ 方向側つまりn-クラッド層44側の界面と接する部分に多くドーピングされ、変調ドーピング構造となっている。本実施例では、n型不純物およびp型不純物のドーピング濃度がほぼ等しい場合について示している。

【0134】なお、本実施例では、MQW発光層45中の量子井戸面内に関して井戸層45bが圧縮歪を有し、障壁層45aが引張り歪を有するため、障壁層45aには井戸層45bとは反対の電位勾配が発生する。

【0135】本実施例では、図29に示すように、電子および正孔が補償され、ドーピングによるキャリアがほとんど発生しないが、イオン化したp型不純物とイオン化したn型不純物とにより圧縮歪井戸層45bの電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0136】(C)第3の実施の形態

第3の実施の形態の発光素子は、量子細線構造または量子箱構造のMQW発光層を有する。

【0137】(12)第12の実施例

図30～図33は第12の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示し、図30は模式的工程断面図、図31はMQW発光層の拡大断面図、図32(a)、(b)は量子細線が形成されたMQW発光層のそれぞれ拡大断面図および模式的平面図、図33は量子細線構造のMQW発光層の拡大断面図、図34は模式的工程断面図である。

【0138】まず、図30に示すように、図17の工程と同様にして、サファイア基板1の(0001)面上に、MOVPE法により、バッファ層2、アンドープGaN層3、n-コンタクト層4、n-クラッド防止層

5、n-第1クラッド層6、n-第2クラッド層7およびMQW発光層8を成長させる。

【0139】図31に示すように、MQW発光層8は、複数の障壁層8aと複数の量子井戸層8bとが交互に積層されてなる。MQW発光層8への不純物のドーピング方法は、第1～第7の実施例と同様である。

【0140】次に、図32に示すように、集束イオンビーム(FIB)等により、MQW発光層8の一部をn-第2クラッド層7に達するまで線状に削り、MQW発光層8を線状に加工する。MQW発光層8の残存する部分の幅は例えば5nm程度であり、FIBにより削った部分の幅は例えば20nm程度とする。

【0141】その後、図33に示すように、MQW発光層8をアンドープGaN層8cで埋め込む。それにより、量子細線構造を有するMQW発光層80が形成される。

【0142】さらに、図34に示すように、MQW発光層80上に、図17の工程と同様にして、MOVPE法により、p-第1クラッド層9、p-第2クラッド層10およびp-キャップ層11を順に成長させる。以後の工程は、図18～図21に示した工程と同様である。

【0143】本実施例の半導体レーザ素子では、量子細線構造を有するMQW発光層80において、基板上的結晶成長方向に電位勾配が発生する。そこで、第1～第7の実施例と同様に、基板上的結晶成長方向に関して不純物を不均一にドーピングする。それにより、量子細線構造のMQW発光層80において発生した電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0144】(13)第13の実施例

図35は第13の実施例における半導体レーザ素子の量子箱構造のMQW発光層の拡大断面図および拡大平面図である。図30、図31、図33および図34を参照しながら第13の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を説明する。

【0145】まず、図30に示すように、図17の工程と同様にして、サファイア基板1の(0001)面上に、MOVPE法により、バッファ層2、アンドープのGa<sub>0.9</sub>N層3、n-コンタクト層4、n-クラック防止層5、n-第1クラッド層6、n-第2クラッド層7およびMQW発光層8を成長させる。

【0146】図31に示すように、MQW発光層8は、複数の障壁層8aと複数の量子井戸層8bとが交互に積層されてなる。MQW発光層8への不純物のドーピング方法は、第1～第7の実施例と同様である。

【0147】次に、図35に示すように、集束イオンビーム(FIB)等により、MQW発光層8の一部をn-第1クラッド層7に達するまで格子状に削り、MQW発光層8を箱状に加工する。MQW発光層8の残存する部分の幅は例えば6nm程度であり、FIBにより削った部分の幅は例えば20nm程度とする。

【0148】その後、図33に示すように、MQW発光層8をアンドープGa<sub>0.9</sub>N層8cで埋め込む。それにより、量子箱構造を有するMQW発光層80が形成される。

【0149】さらに、図34に示すように、MQW発光層80上に、図17の工程と同様にして、MOVPE法により、p-第1クラッド層9、p-第2クラッド層10およびp-キャップ層11を順に成長させる。以後の工程は、図18～図21に示した工程と同様である。

【0150】本実施例の半導体レーザ素子では、量子箱構造を有するMQW発光層80において、基板上の結晶成長方向に電位勾配が発生する。そこで、第1～第7の実施例と同様に、基板上の結晶成長方向に関して不純物を不均一にドーピングする。それにより、量子箱構造のMQW発光層80において発生した電位勾配が減少する。その結果、電流として注入された電子と正孔との分離が抑制されるので、発光効率の低下およびしきい値電流の上昇が抑制される。

【0151】なお、量子細線構造および量子箱構造の発光層80において、電位勾配の発生する方向は、基板上の結晶成長方向に限らない。基板の面方位、量子細線あ

$$P_z = \epsilon_{xx} \cos \beta (e_{31} \cos^2 \beta + e_{33} \sin^2 \beta - e_{15} \sin^2 \beta) + \epsilon_{yy} e_{31} \cos \beta + \epsilon_{zz} \cos \beta (e_{31} \sin^2 \beta + e_{33} \cos^2 \beta + e_{15} \sin^2 \beta) + \epsilon_{xz} \sin \beta (2e_{31} \cos^2 \beta - 2e_{33} \cos^2 \beta + e_{15} \sin^2 \beta) \cdots (1)$$

z軸方向の電極 $P_z$ は $\alpha$ に無関係である。上式(1)から、ウルツ鉱型結晶では、例えば角度 $\beta$ が $90^\circ$ となる場合に、z軸方向の分極 $P_z$ が0となる。すなわち、図36のz軸がXY平面上にある場合に量子井戸の閉じ込め方向に歪による電位勾配が発生しない。したがって、前述したように、一般式(HKL0)面(H、Kおよび

$$P_z = \epsilon_{xx} e_{14} \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) - \epsilon_{yy} e_{14} \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta + 3 \epsilon_{zz} e_{14} \sin \alpha \cos \alpha \sin^2 \beta \cos \beta + 2 \epsilon_{yz} e_{14} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \sin \beta \cos \beta + 2 \epsilon_{xz} e_{14} \sin$$

るいは量子箱の方位、量子細線あるいは量子箱の形状等により、基板の面内方向に電位勾配が発生する場合があります。このような場合には、イオン注入等の方法で、基板の面内方向に関してドーピングを不均一にすればよい。

【0152】なお、上記第1～第13の実施例では、本発明を半導体レーザ素子に適用した場合について説明したが、本発明は、発光ダイオード等の他の発光素子にも適用することができる。

【0153】○歪により電位勾配の発生する量子井戸層の面方位

量子井戸の閉じ込め方向の分極は、PIEZOELECTRICITY Vol. 1 (New Revised Edition) by W.G. Cady Dover Publications, Inc. New York 1964等の文献にしたがって、計算することができる。

【0154】図36において、z軸を量子井戸の閉じ込め方向とする。XYZ座標系をZ軸を回転軸として角度 $\alpha$ 回転させる。回転後の座標軸は、X軸が $\xi$ 軸に移り、Y軸が $y$ 軸に移る。

【0155】 $\xi y z$ 座標系をy軸を回転軸として角度 $\beta$ 回転させる。回転後の座標軸は、 $\xi$ 軸がx軸に移り、Z軸がz軸に移る。

【0156】ウルツ鉱型結晶では、X軸を結晶の[2-1-10]軸とし、Y軸を[01-10]軸とし、Z軸を[0001]軸とする。また、閃亜鉛鉱型結晶では、X軸を結晶の[100]軸とし、Y軸を[010]軸とし、Z軸を[001]軸とする。

【0157】ここで、z軸方向の分極を $P_z$ とし、歪テンソルを $\epsilon_{xx}$ 、 $\epsilon_{yy}$ 、 $\epsilon_{yz}$ 、 $\epsilon_{xz}$ 、 $\epsilon_{xy}$ とし、圧電係数(piezoelectric stress coefficients)を $e_{31}$ 、 $e_{33}$ 、 $e_{15}$ 、 $e_{14}$ とする。

【0158】第1～第11の実施例のような通常の量子井戸構造では電位勾配はz軸方向の分極 $P_z$ に比例し、 $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy}$ 、 $\epsilon_{yz} = \epsilon_{xz} = \epsilon_{xy} = 0$ であり、 $\epsilon_{xx}$ と $\epsilon_{zz}$ の符号が異なる。

【0159】ウルツ鉱型結晶では、z軸方向の分極 $P_z$ は次式で表される。

Lは、 $H+K+L=0$ を満足し、かつ $H=K=L=0$ を除く任意の数)で表される面方位では、量子井戸の閉じ込め方向に電位勾配が発生せず、それ以外の面方位では量子井戸の閉じ込め方向に電位勾配が発生する。

【0160】また、閃亜鉛鉱型結晶では、z軸方向の分極 $P_z$ は次式で表される。

$$n \alpha \cos \alpha \sin \beta (2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) + 2 \epsilon_{xy} e_{14} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \cdots (2)$$

上式(2)から、閃亜鉛鉱型結晶では、例えば角度 $\alpha$ が $0^\circ$ または $90^\circ$ となる場合または角度 $\beta$ が $0^\circ$ または $90^\circ$ となる場合に、 $z$ 方向の分極 $P_z$ が0となる。したがって、前述したように、一般式(0MN)面(MおよびNは、 $M=N=0$ を除く任意の数)で表される面方位およびこれと等価な面方位では、量子井戸の閉じ込め方向に電位勾配が発生せず、それ以外の面方位では、量子井戸の閉じ込め方向に電位勾配が発生する。

【0161】圧電係数の値は、LANDOLT-BORNSTEIN Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology New Series Group III; Crystal and Solid State Physics Vol. 17a, Edited by O. Madelung, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg 1982等に記載されている。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1～第7の実施例における半導体レーザ素子の構成を示す模式的斜視図である。

【図2】図1の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図3】第1の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図4】第1の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図5】第2の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図6】第2の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図7】第3の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図8】第3の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図9】第4の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図10】第4の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図11】第5の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図12】第5の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図13】第6の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図14】第6の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図15】第7の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図16】第7の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図17】図1の半導体レーザ素子の製造方法を示す模

式的工程断面図である。

【図18】図1の半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図19】図1の半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図20】図1の半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

10 【図21】図1の半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図22】第9の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図23】第9の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図24】本発明の第10の実施例における埋め込みリッジ構造のAlGaInP系半導体レーザ素子の構造を示す模式的断面図である。

20 【図25】第10の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図26】第10の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図27】本発明の第11の実施例におけるZnSe系半導体レーザ素子の構造を示す模式的断面図である。

【図28】第11の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

【図29】第11の実施例の半導体レーザ素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

30 【図30】第12の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

【図31】第12の実施例における半導体レーザ素子のMQW発光層の拡大断面図である。

【図32】第12の実施例における半導体レーザ素子の量子細線構造が形成されたMQW発光層の拡大断面図および模式的平面図である。

【図33】第12の実施例における半導体レーザ素子の量子細線構造のMQW発光層の拡大断面図である。

【図34】第12の実施例における半導体レーザ素子の製造方法を示す模式的工程断面図である。

40 【図35】第13の実施例における半導体レーザ素子の量子箱構造が形成されたMQW発光層の拡大断面図および模式的平面図である。

【図36】歪により電位勾配が発生する量子井戸層の面方位を説明するための図である。

【図37】従来のGaN系半導体発光素子の構成を示す模式的断面図である。

【図38】従来の半導体発光素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

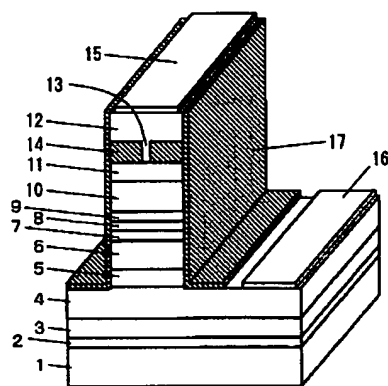
50 【図39】従来の半導体発光素子におけるMQW発光層のエネルギーバンド図である。

## 【符号の説明】

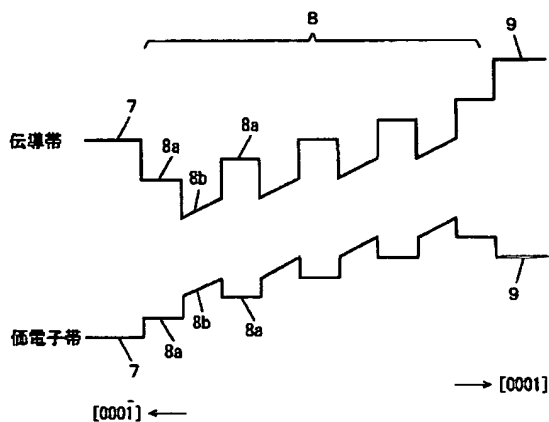
- 1 サファイア基板  
 6 n-第1クラッド層  
 7 n-第2クラッド層  
 8, 24, 45, 80 MQW発光層  
 9 p-第1クラッド層

- 10 p-第2クラッド層  
 8a, 24a, 45a 障壁層  
 8b 量子井戸層  
 23, 45 n-クラッド層  
 27, 46 p-クラッド層  
 24b, 45b 井戸層

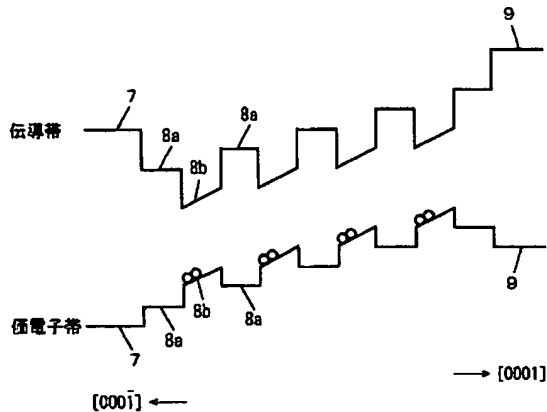
【図1】



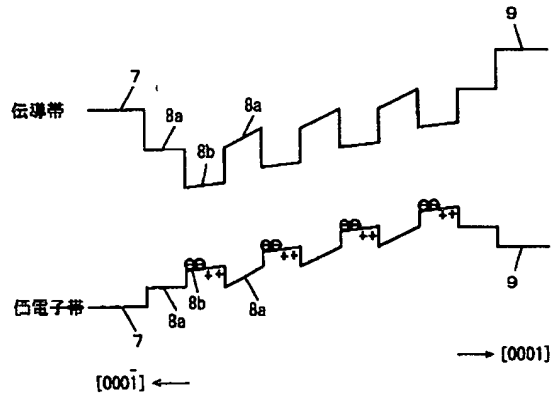
【図2】



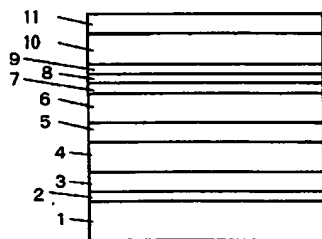
【図3】



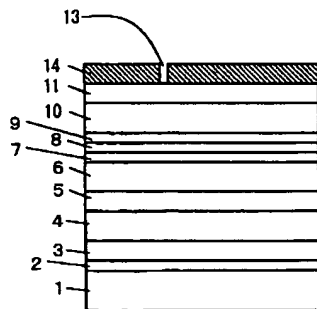
【図4】



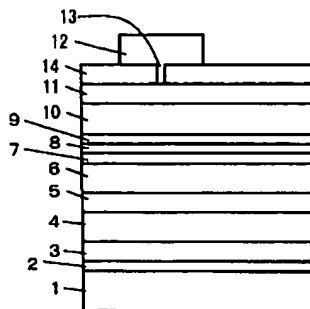
【図17】



【図18】

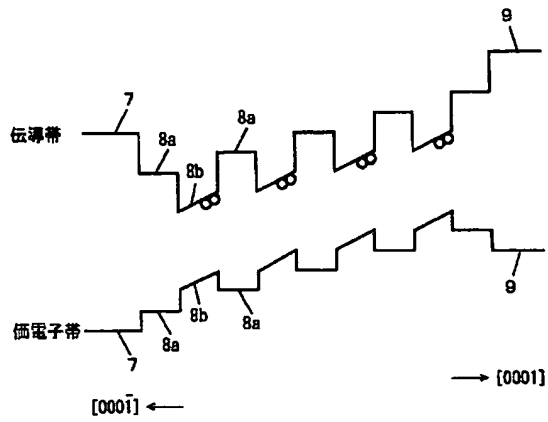


【図19】

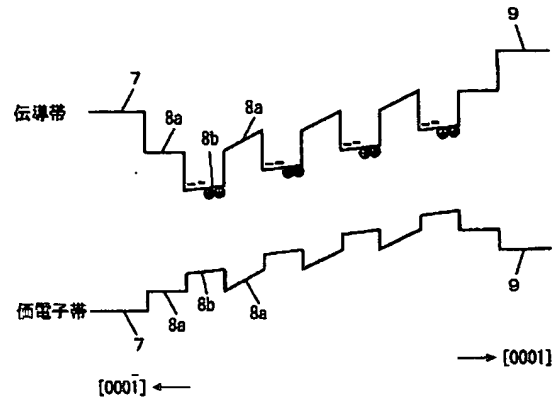




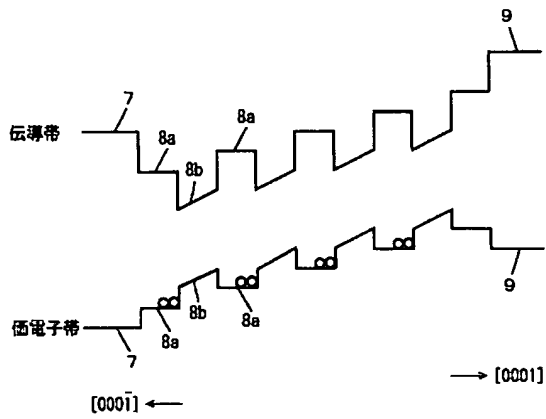
【図 5】



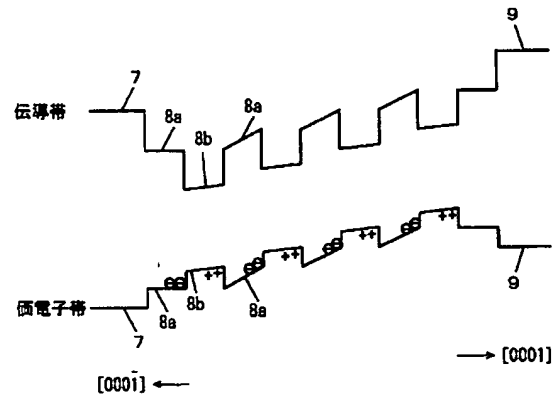
【図 6】



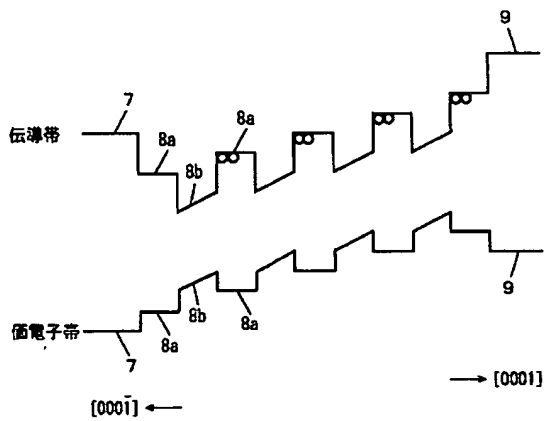
【図 7】



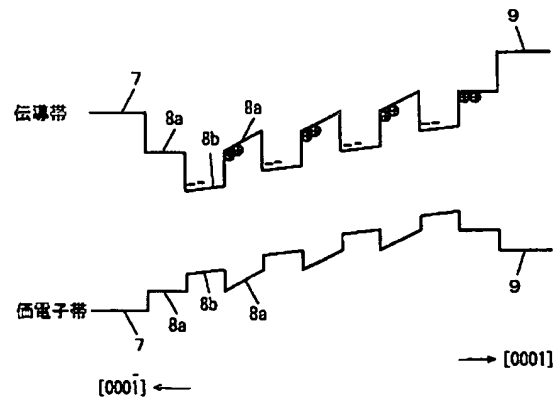
【図 8】



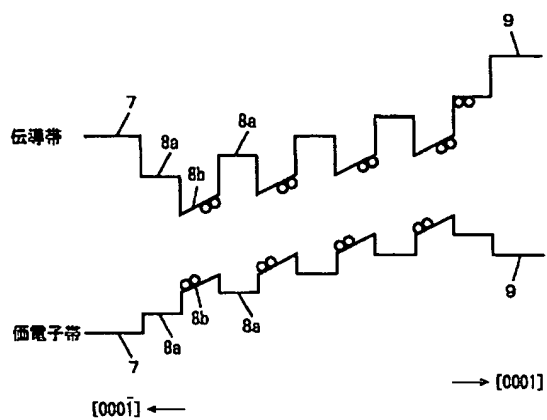
【図 9】



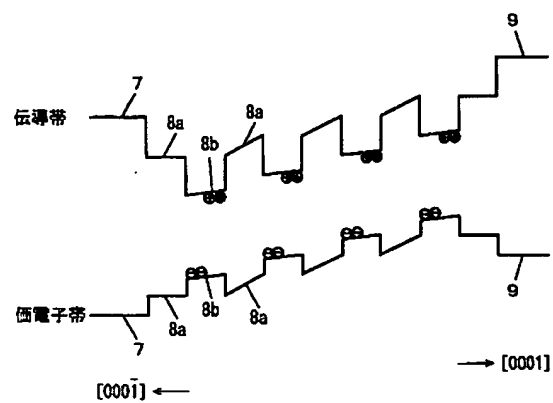
【図 10】



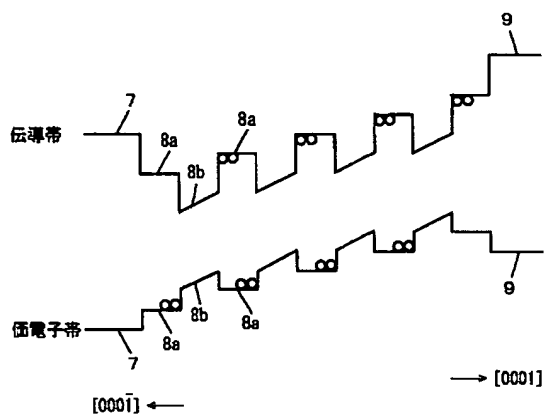
【図11】



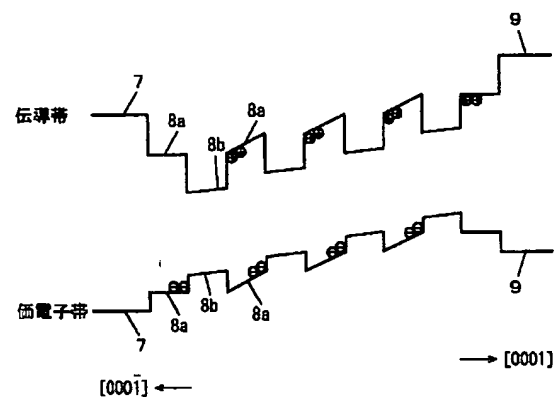
【図12】



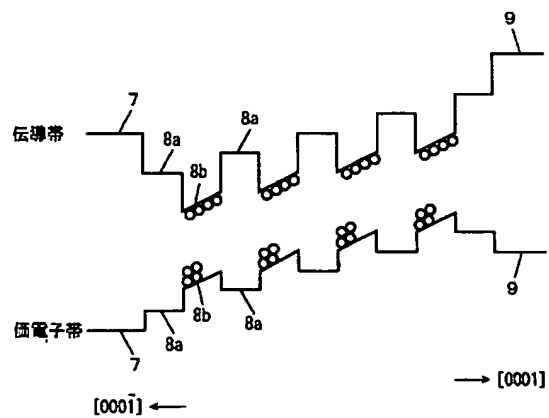
【図13】



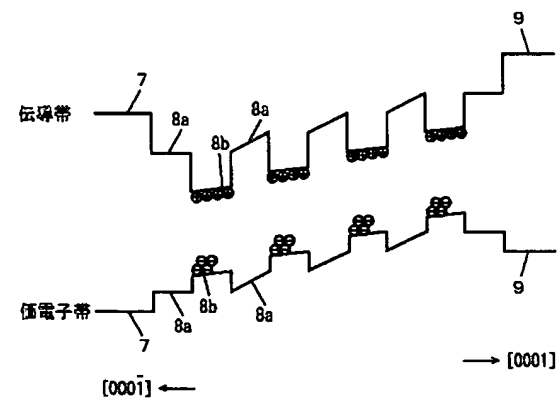
【図14】



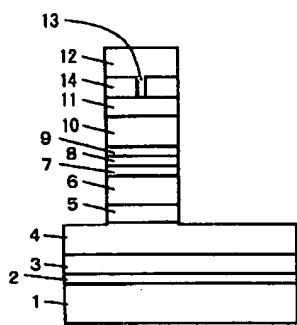
【図15】



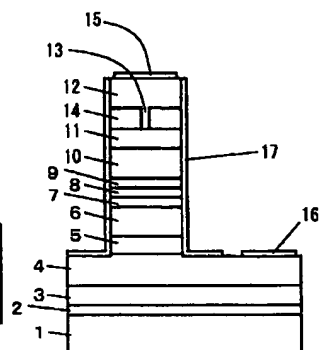
【図16】



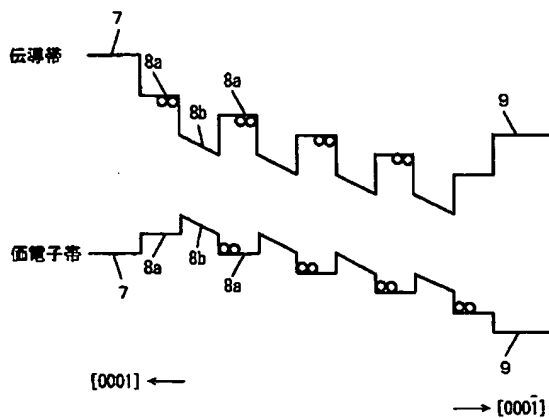
【図 20】



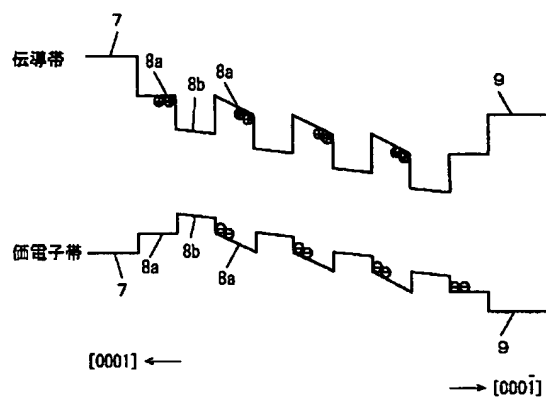
【図 21】



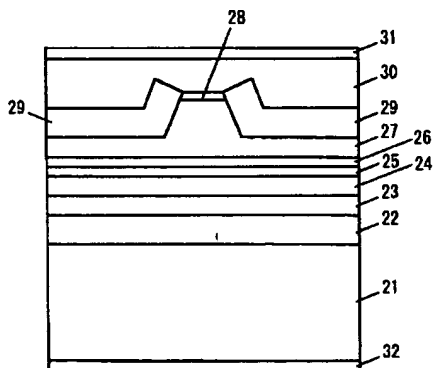
【図 22】



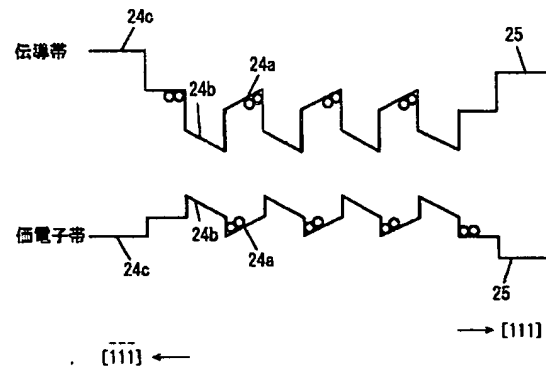
【図 23】



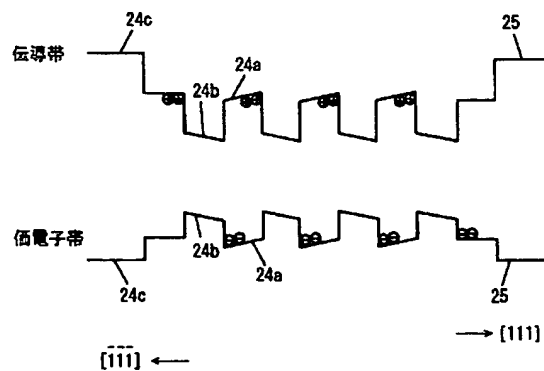
【図 24】



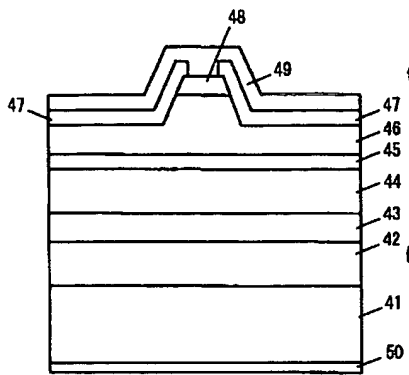
【図 25】



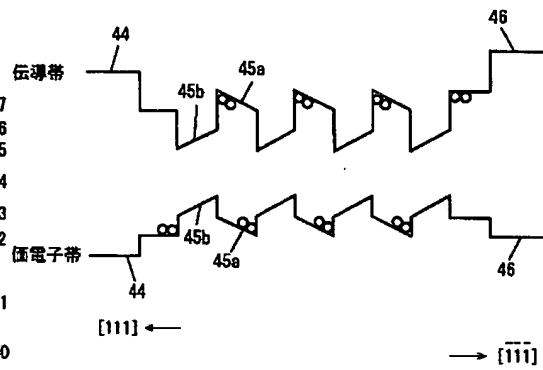
【図 26】



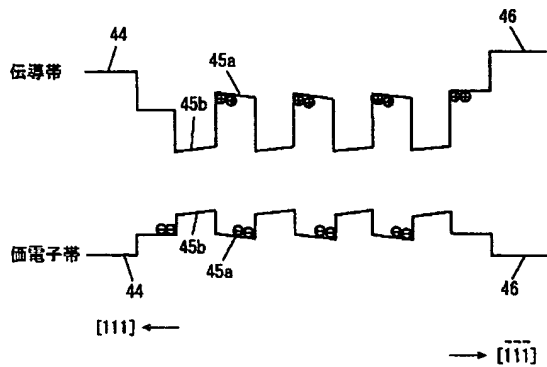
【図 27】



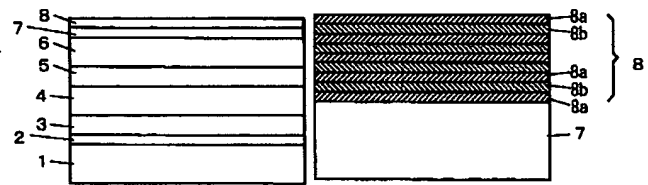
【図 28】



【図 29】



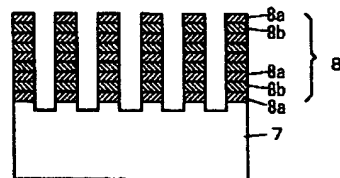
【図 30】



【図 31】

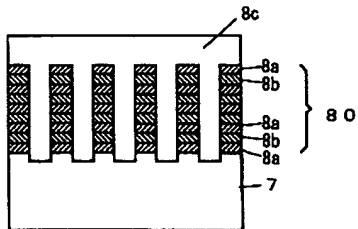
【図 32】

(a)

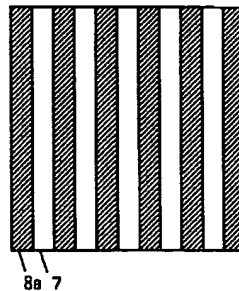
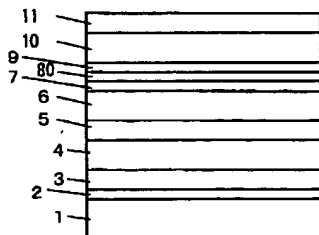


(b)

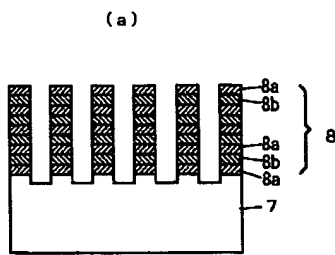
【図 33】



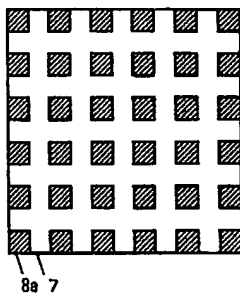
【図 34】



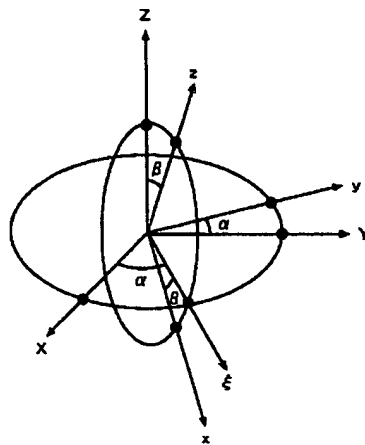
【図35】



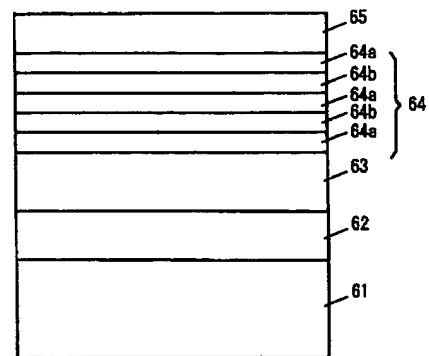
(b)



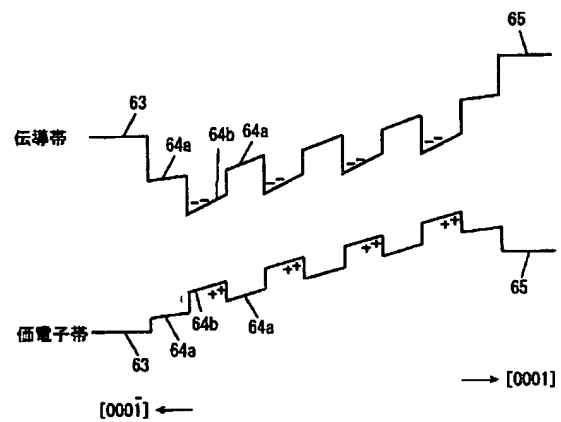
【図36】



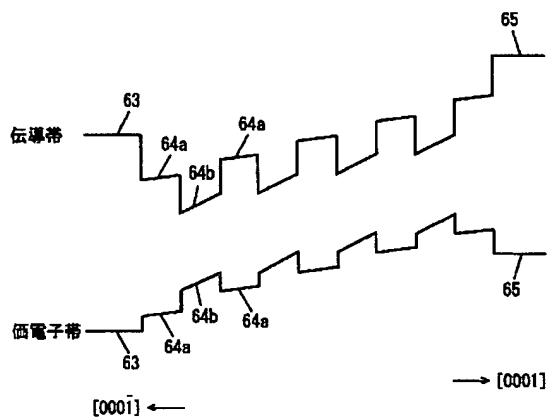
【図37】



【図39】



【図38】



フロントページの続き

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>

H01S 5/347

識別記号

F I

H01S 3/18

テーマコード(参考)

678

F ターム (参考) 5F041 AA03 CA04 CA05 CA34 CA35  
CA40 CA41 CA43 CA44 CA46  
CA65  
5F073 AA04 AA13 AA51 AA71 AA74  
AA75 CA07 CA14 CA22 CB02  
CB05 CB17 DA05 EA23 EA29